

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2000-133884

(43)Date of publication of application : 12.05.2000

(51)Int.Cl.

H01S 5/343

H01S 5/34

H01L 33/00

(21)Application number : 10-302959

(71)Applicant : SHOWA DENKO KK

(22)Date of filing : 23.10.1998

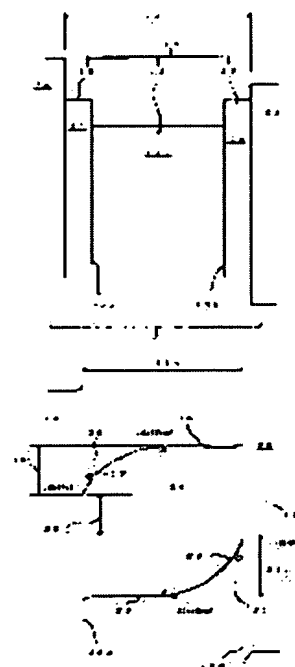
(72)Inventor : UDAGAWA TAKASHI

## (54) QUANTUM WELL STRUCTURE LIGHT-EMITTING DEVICE

(57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To realize an n-type light-emitting layer of quantum well structure which is superior in emission intensity and monochromaticity by a method, wherein the conductor of a terminal well layer is so formed in potential as to be curved and protrudes downward on a low potential side toward the Fermi level.

**SOLUTION:** A single-quantum well structure has a structure, where a well layer 11 is pinched between a barrier layer 10 and an interposing layer 12 to form a light-emitting layer. The light-emitting layer 1a is pinched between an n-type clad layer 13 and a p-type clad layer 14 to form a light-emitting section 1. That is, the well layer 11 serves as a terminal well layer 11a, and the interposing layer 12 is inserted between the terminal well layer 11a and the p-type clad layer 14. At this point, a conductor 16 is formed curved protruding downward to form a low potential section 18, only in the inner region of the terminal well layer 11a near its junction interface 15a with the n-type interposition layer 12. With this setup, a light-emitting layer of quantum well structure formed of III nitride semiconductor and superior in monochromaticity can be realized.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 04.07.2000

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 3399374

[Date of registration] 21.02.2003

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's  
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2000-133884

(P 2 0 0 0 - 1 3 3 8 8 4 A)

(43) 公開日 平成12年5月12日 (2000. 5. 12)

(51) Int. Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テームコード (参考)	
H01S 5/343		H01S 3/18	677	5F041
5/34			676	5F073
H01L 33/00		H01L 33/00		C

審査請求 未請求 請求項の数 9 O L (全16頁)

(21) 出願番号 特願平10-302959

(22) 出願日 平成10年10月23日 (1998. 10. 23)

(71) 出願人 000002004

昭和電工株式会社

東京都港区芝大門1丁目13番9号

(72) 発明者 宇田川 隆

埼玉県秩父市大字下影森1505番地 昭和電  
工株式会社総合研究所秩父研究室内

(74) 代理人 100094237

弁理士 矢口 平

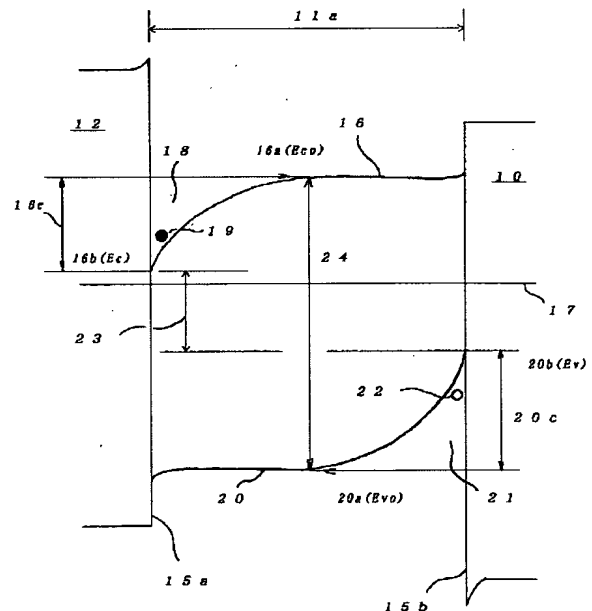
Fターム(参考) 5F041 CA05 CA34 CA40 CA57 CA58  
5F073 AA41 AA51 AA74 CA07 CB17

(54) 【発明の名称】 量子井戸構造発光素子

(57) 【要約】

【課題】 低インジウム組成比の、結晶性に優れるインジウム含有III族窒化物半導体を井戸層として、発光の単色性及び強度に優れ、また、比較的長波長の可視光を簡便に放射できる構成のp-n接合型DH構造の量子井戸発光素子を提供する。

【解決手段】 量子井戸構造発光層の終端を構成する終端井戸層を、組成及び層厚を略同一とするn形介在層及びn形障壁層で挟持して、終端井戸層内に、伝導帯及び価電子帯が低ポテンシャル側に屈曲したバンド構成を保有させる構成とする。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 結晶基板の一表面上に形成され、III族窒化物半導体結晶層からなるn形及びp形クラッド層に挟持されたn形発光層を備えた、pn接合型ダブルヘテロ(DH)構造の発光素子において、

前記n形発光層は、単一若しくは多重の量子井戸構造を有し、

該量子井戸構造の末端を構成する井戸層(末端井戸層)とp形クラッド層との中間に、n形のIII族窒化物半導体から成る介在層が配置され、

該末端井戸層が、前記n形介在層と末端井戸層との接合界面近傍の領域において、該末端井戸層の伝導帯を、フェルミレベル(Fermi level)に向けて低ポテンシャル側に下に凸に曲折させたポテンシャル構成を有する、インジウム(In)を含有するn形のIII族窒化物半導体結晶層から成ることを特徴とする量子井戸構造発光素子。

【請求項2】 前記末端井戸層は、前記n形介在層と、該n形介在層に末端井戸層を挟んで対峙するn形障壁層との間に挟持されていることを特徴とする請求項1に記載の量子井戸構造発光素子。

【請求項3】 前記n形障壁層は、前記n形介在層と略同一の組成で略同一の層厚から成ることを特徴とする請求項2に記載の量子井戸構造発光素子。

【請求項4】 前記末端井戸層は、前記n形障壁層との接合界面近傍の領域において、該末端井戸層の価電子帯をフェルミレベルに向けて上に凸に曲折させた低ポテンシャル領域を有することを特徴とする請求項2または3に記載の量子井戸構造発光素子。

【請求項5】 前記末端井戸層は、伝導帯の本来のポテンシャルレベル(Eco)とフェルミレベル側へ落ち込んだ低ポテンシャル端(Ec)とのエネルギー差( $\Delta E_c = |E_{co} - E_c|$ )と、価電子帯の本来のポテンシャルレベル(Evo)とフェルミレベル側へ落ち込んだ低ポテンシャル端(Ev)とのエネルギー差( $\Delta E_v = |E_{vo} - E_v|$ )との合計のエネルギー差( $\Delta E_c + \Delta E_v$ )を、0.4エレクトロンボルト(eV)以上とする伝導帯及び価電子帯の曲折を有することを特徴とする請求項4に記載の量子井戸構造発光素子。

【請求項6】 前記n形発光層は、多重の量子井戸構造を有し、前記末端井戸層の層厚は、上記の合計のエネルギー差( $\Delta E_c + \Delta E_v$ )を他の井戸層の合計のエネルギー差よりも大とすることを特徴とする請求項4または5に記載の量子井戸構造発光素子。

【請求項7】 前記n形発光層は、多重の量子井戸構造を有し、前記末端井戸層の層厚を、他の井戸層の層厚以下としたことを特徴とする請求項1乃至6の何れかに記載の量子井戸構造発光素子。

【請求項8】 前記末端井戸層を、インジウム組成比

(=X)を0.3以下から成る主体相と、該主体相とは

インジウム組成比を相違し主体相との接合境界領域に歪層を存在させた従属相とを含む多相構造のn形窒化ガリウム・インジウム( $Ga_{1-x}In_xN$ :  $0 \leq X \leq 0.3$ )から構成したことを特徴とする請求項1乃至7の何れかに記載の量子井戸構造発光素子。

【請求項9】 前記多相構造からなる末端井戸層を、酸素原子濃度を $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上で $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以下とする、n形の $Ga_{1-x}In_xN$  ( $0 \leq X \leq 0.3$ )結晶から構成したことを特徴とする請求項8に記載の量子井戸構造発光素子。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、III族窒化物半導体結晶からなる量子井戸構造体を発光層とするpn接合型DH構造の量子井戸構造発光素子を形成するための技術に係わり、特に高輝度で且つ単色性に優れた発光をもたらす量子井戸構造の発光層を構成するための技術に関する。

## 【0002】

【従来技術】実用化に至っている青色帯或いは緑色帯などの短波長可視光を放射する発光ダイオード(LED)等の発光素子の全んどは、III族窒化物半導体の一種であるn形の窒化ガリウム・インジウム( $Ga_{1-\alpha}In_{\alpha}N$ :  $0 \leq \alpha \leq 1$ )を発光層(活性層)として構成されている。 $Ga_{1-\alpha}In_{\alpha}N$ が、インジウム組成比( $=1-\alpha$ )如何に依って、大凡、2.0エレクトロンボルト(eV)から約3.4eVに亘る、短波長の可視光或いは近紫外光を出射するに好都合な禁止帯幅を室温で与えるのが大きな理由である(特許出願公告昭和55年第3834号参照)。

【0003】従来の発光部の構成は、n形及びp形のクラッド層間に、 $Ga_{1-\alpha}In_{\alpha}N$ からなる発光層を挟持した、所謂pn接合型のダブルヘテロ(double hetero: DH)構造から構成するのが一般的である(Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 34, Part 2, No. 10B (1995), L1332~L1335頁参照)。一方、発光層の結晶構造的な構成の従来例を省みれば、インジウム組成を均一とする $Ga_{1-\alpha}In_{\alpha}N$ の単一の層から発光層を構成する例がある(特開平9-36430号公報明細書参照)。また、積層構造的に観れば、単一量子井戸(Single Quantum Well: SQW)構造或いは多重量子井戸(Multi Quantum Well: MQW)構造から構成する技術が開示されている(特開平9-36430号公報明細書参照)。

【0004】発光層をSQW或いはMQW構造から構成すれば、特に単色性に優れる発光が得られる利点がある。また、レーザダイオード(LD)にあつては、発振閾値の低下がもたらされる利点があるからである(末松安晴著、「光デバイス」(株)コロナ社、平成9年

5月15日、初版第8刷発行)、63頁参照)。

【0005】MQWの構成要素でもある従来のSQWのエネルギー帯構造を模式的に図9に例示する。SQWは、基本的に、障壁作用を呈する層010、011と、それに挟持された発光層たる井戸層012との接合をもって構成される。量子井戸構造の発光層を構成するにあたり、障壁層の層厚は略同一とするのが従来例である

(特開平9-36422号公報明細書参照)。井戸層も同様に、量子井戸構造の終端を構成する井戸層(終端井戸層)を含めて略同一の層厚のGa<sub>0.95</sub>In<sub>0.05</sub>Nから構成する例が知れている(特開平9-36423号公報明細書参照)。

【0006】また、図10は、図9に例示したSQW構造に於ける矩形ポテンシャル構成を示すものである。障壁層010、011は、井戸層012の禁止帯幅013よりも大きなバンドギャップ014、015の材料から構成されるのが常である。井戸層012が配置された領域のポテンシャル井戸部016の伝導帯017側には、伝導帯端から一定の準位を保った量子準位019、020が発生している。また、価電子帯018側にも、価電子帯端から一定の準位を保った量子準位021、022が発生している。この量子準位019~022の発生により、遷移エネルギー023、024は、井戸層012の禁止帯幅013より大となるのが常識である(上記の「光デバイス」、63頁参照)。従って、量子井戸構造からの発光の波長は、井戸層を成す材料が本来有する禁止帯幅に対応する波長よりも、より短波長側に移行するものとなるのが理論の教えるところである。

【0007】量子井戸構造の発光層を備えた従来のIII族窒化物半導体DH構造の発光素子にあって、発光部のポテンシャル構成は、図10に例示する如く、井戸層012を中心として線対称型の矩形ポテンシャル構成となっているのがもっぱらである(①特開平8-116128号公報及び②特開平9-84122号公報参照)。或いは、伝導帯及び価電子帯のレベルが一様に直線的に変化するポテンシャル構成となっているものである(Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 449 (1997)、1167~1172頁参照)。しかしながら一方では、この様な一般的な矩形ポテンシャル井戸構造からも、量子力学的理論が指摘する理論的帰結とは反対に、井戸層(発光層)を構成するIII族窒化物半導体の正規の(本来の)バンドギャップエネルギーよりも小さなエネルギーの発光をもたらす窒化物半導体発光素子が知られている(①特開平8-316528号公報及び②EUROPEAN PATENT APPLICATION EP-0 716 457 A2参照)。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】Ga<sub>α</sub>In<sub>1-α</sub>Nを井戸層とする量子井戸構造の発光層にあって、発光波長を制御するために利用される一つの従来技術として、イン

ジウム組成比(=1-α)に変化を与える手段がある。例えば、発光波長のより長波長化を所望するにあつては、インジウム組成比を比較的大とするGa<sub>α</sub>In<sub>1-α</sub>Nを井戸層とする施策が講じられる。インジウム組成比の増大に伴い、Ga<sub>α</sub>In<sub>1-α</sub>Nの禁止帯幅は小となり、それに応じて発光波長は長波長となるからである(特公昭55-3834号参照)。

【0009】しかし、インジウム組成比が、例えば約0.4から約0.5と高いGa<sub>α</sub>In<sub>1-α</sub>Nを得るには、成膜温度を600℃前後の低温に設定することが余儀なくされる(Materials Letters, 35 (1985)、85~89頁参照)。500℃前後の低温で成膜したGa<sub>α</sub>In<sub>1-α</sub>Nは、結晶性に劣るものであることが知られている(「電子情報通信学会誌」、Vol. 76, No. 9 (1993年9月)、913~917頁参照)。井戸層を構成するIII族窒化物半導体結晶層の優劣は、発光素子の発光強度の高低に反映される。結晶性に劣るGa<sub>α</sub>In<sub>1-α</sub>Nから井戸層を構成することは、強度的に優れる発光をもたらす量子構造発光層を得る妨げとなる。即ち、高輝度の量子井戸構造の発光素子が得られ難いのが従来技術に於ける一つの問題点である。

【0010】量子井戸構造では、井戸層内にキャリアの遷移エネルギーの増大を帰結する量子準位が発生する(例えば、特開平9-84122号公報参照)。従って、同一の発光波長を獲得するに当たって、単一層から発光層を構成する場合に比較して更に、インジウム組成比を大とするGa<sub>α</sub>In<sub>1-α</sub>Nから井戸層を構成する必要が生ずる。上記の様に、高インジウム組成比となすべく、低温で成膜したGa<sub>α</sub>In<sub>1-α</sub>N結晶程、結晶性はより劣るものとなる。即ち、高いインジウム組成比のGa<sub>α</sub>In<sub>1-α</sub>Nから成る量子井戸構造発光層からは、強度的に優れる例えば、緑色帯等の短波長可視光を都合良く得られないのが現状である。

【0011】一方、別の従来技術に倣い、井戸層を構成するIII族窒化物半導体の正規の禁止帯幅に対応するよりも、より長波長の発光をもたらすとされる量子井戸構造から発光層を構成するにしても(特許第2780691号参照)、理論上発光の長波長化が達成出来ない理不尽な矩形ポテンシャル井戸構造とは、別のポテンシャル構成を發明する必要がある。本發明が解決すべき第1の課題も此処に有り、単色性に優れる発光をもたらす優位性を備えた、結晶成長が簡便で尚且結晶性に優れる比較的に低いインジウム組成比のGa<sub>α</sub>In<sub>1-α</sub>Nをもってしても、例えば、青緑帯或いは緑色帯等の発光が容易に、安定して得られる量子井戸構造の構成を提供することにある。特に、バンド構造の観点から好適なポテンシャル構成を備えた量子井戸構造の構成を提供することにある。

【0012】また、本發明が第2の課題とするところ

は、井戸層を構成する  $Ga_{1-x}In_xN$  の結晶性に依って、発光強度に敏感に変化を来す従来の問題にあつて、例えば、青緑帯或いは更なる高強度の発光をもたらすために、量子井戸構造の井戸層が備えるべき要件を、結晶材料的な観点から明確にすることにある。本発明の目的は、上記の主たる課題を解決して、発光強度にも、また、発光の単色性にも優れる、III 族窒化物半導体から成る量子井戸構造の発光層を備えた発光素子を提供することにある。

#### 【0013】

【課題を解決するための手段】本発明は、上記の従来技術の問題点を克服して、発光の強度及び単色性の何れにも優れる量子井戸構造の n 形発光層を備えた、量子井戸構造発光素子を提供することを目的として成されたものである。特に、請求項 1 に記載の発明は、従来技術に於いて不明確であった、井戸層（活性層）を構成する半導体材料の禁止帯よりも低いエネルギーの発光をもたらすに理に叶い、且つ好都合であるバンド構造を内包する単一若しくは多重量子井戸構造の発光層を備えた発光素子について提示するものである。また、そのバンド構成を都合良くもたせらる井戸層に係わる接合構成を述べることにある。

【0014】即ち、請求項 1 に記載の発明は、結晶基板の一表面上に形成され、III 族窒化物半導体結晶層からなる n 形及び p 形クラッド層に挟持された n 形発光層を備えた、pn 接合型ダブルヘテロ（DH）構造の発光素子において、前記 n 形発光層は、単一若しくは多重の量子井戸構造を有し、該量子井戸構造の終端を構成する井戸層（終端井戸層）と p 形クラッド層との中間に、n 形の III 族窒化物半導体から成る介在層が配置され、該終端井戸層が、前記 n 形介在層と終端井戸層との接合界面近傍の領域において、該終端井戸層の伝導帯を、フェルミレベル（Fermi level）に向けて低ポテンシャル側に下に凸に曲折させたポテンシャル構成を有する、インジウム（In）を含有する n 形の III 族窒化物半導体結晶層から成ることを特徴としている。

【0015】また、請求項 2 の発明は、請求項 1 に記載の発明に於いて、前記終端井戸層が、前記 n 形介在層と該 n 形介在層に終端井戸層を挟んで対峙する n 形障壁層との間に挟持されていることを特徴としている。

【0016】また、請求項 3 の発明は、請求項 2 に記載の発明において、前記 n 形障壁層を、前記 n 形介在層と略同一の組成で略同一の層厚から成すことを特徴としている。

【0017】また、請求項 4 に記載の発明は、発光波長の長波長化をもたらすに優位なポテンシャル構成を内包させた終端井戸層に関するものである。即ち、請求項 4 に記載の発明は、請求項 2 または 3 に記載の発明において、前記終端井戸層が、前記 n 形障壁層との接合界面近傍の領域において、該終端井戸層の価電子帯をフェルミ

レベルに向けて上に凸に曲折させた低ポテンシャル領域を有することを特徴とするものである。

【0018】また、請求項 5 に記載の発明は、請求項 4 に記載の発明において、井戸層を構成する半導体材料の禁止帯幅に対応するよりも長波長の発光をもたらせる、バンドの曲折の大きさを都合良く規定した発明である。即ち、請求項 5 に記載の発明において、終端井戸層は、伝導帯の本来のポテンシャルレベル（ $E_{co}$ ）と、フェルミレベル側へ落ち込んだ低ポテンシャル端（ $E_c$ ）との、エネルギー差（ $\Delta E_c = |E_{co} - E_c|$ ）と、価電子帯の本来のポテンシャルレベル（ $E_{vo}$ ）と、フェルミレベル側へ落ち込んだ低ポテンシャル端（ $E_v$ ）とのエネルギー差（ $\Delta E_v = |E_{vo} - E_v|$ ）との、合計のエネルギー差（ $\Delta E_c + \Delta E_v$ ）を、0.4 エレクトロンボルト（eV）以上とする伝導帯及び価電子帯の曲折を有することを特徴としている。

【0019】また、請求項 6 に記載の発明は、請求項 4 または 5 に記載の発明にあつて、特に、多重量子井戸構造から成る発光層から、単色性に優れる発光を得るための構成を提供するものである。即ち、請求項 6 に記載の発明は、請求項 4 または 5 に記載の発明において、前記 n 形発光層が多重の量子井戸構造を有し、前記終端井戸層の層厚は、上記の合計のエネルギー差（ $\Delta E_c + \Delta E_v$ ）を他の井戸層の合計のエネルギー差よりも大とすることを特徴としている。

【0020】また、請求項 7 に記載の発明は、請求項 1 乃至 6 の何れかに記載の発明において、単色性に優れ、尚且、特に、発光の長波長化をもたらすに都合の良い終端井戸層を構成する上での優位性を提供するものである。即ち、請求項 7 に記載の発明は、請求項 1 乃至 6 の何れかに記載の発明において、前記 n 形発光層が多重の量子井戸構造を有し、前記終端井戸層の層厚を他の井戸層の層厚以下としたことを特徴としている。

【0021】また、請求項 8 に記載の発明は、請求項 1 乃至 7 に記載の発明において、発光強度の増加が図れる終端井戸層を構成するための要件を提示するものである。即ち、請求項 8 に記載の発明は、請求項 1 乃至 7 に記載の発明において、前記終端井戸層を、インジウム組成比（ $=X$ ）を 0.3 以下とする主体相と、該主体相とはインジウム組成比を相違し、主体相との接合境界領域に歪層を存在させた従属相とを含む多相構造の n 形窒化ガリウム・インジウム（ $Ga_{1-x}In_xN$ ：0 ≤ X ≤ 0.3）から構成することを特徴としている。

【0022】また、請求項 9 に記載の発明は、請求項 8 に記載の発明にあつて、更に発光強度を増大させるために井戸層が備えるべき要件を提示するものである。即ち、請求項 9 に記載の発明は、請求項 8 に記載の発明において、前記多相構造からなる終端井戸層を、酸素原子濃度を  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  以上で  $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  以下とする、n 形の  $Ga_{1-x}In_xN$ （0 ≤ X ≤ 0.3）結晶

から構成したことを特徴としている。

### 【0023】

【発明の実施の形態】本願の請求項1に記載の発明に係る第1の実施形態について、量子井戸構造を単一量子井戸(SQW)構造とした場合を説明する。図1に、障壁層10、井戸層11、及び介在層12を順次、積層した構造から成る、SQW構造1bのpn接合型DH構造の発光部1のエネルギー帯構造を例示する。本発明に係るSQW構造1bは、1個の障壁(バリア: barrier)層10と、1個の介在層12とで、1個の井戸層11を挟持した構成から成り、この構成より発光層1aが形成されている。発光層1aは、n形クラッド層13とp形クラッド層14とに挟持され、発光部1が構成されている。この唯一の井戸層から成るSQW構造にあっては、その唯一の井戸層11が終端井戸層11aである。本発明の量子井戸構造の特徴は、終端井戸層11aとp形クラッド層14との中間に介在層12が挿入された構成にある。即ち、本発明では、終端井戸層11aを、p形結晶層に直接、接合させる構成とはしていない。

【0024】図2は、本願の請求項1に記載の発明に係る第1の実施形態の量子井戸構造を多重量子井戸(MQW)構造とした場合を、エネルギー帯構造を基に説明するための図である。SQW構造の場合と同様に、終端井戸層11aとp形クラッド層14との中間に介在層12が挿入される構成となっている。このMQW構造1dの発光層1aは、n形及びp形クラッド層13、14に挟持され、発光部1が構成されている。介在層12に接合する、MQW構造1dの最終端を構成する井戸層11aが終端井戸層である。第1近接井戸層としての終端井戸層11aの次に介在層12に隣接している井戸層が第2近接井戸層11bである。第2近接井戸層11bより、n形クラッド層13に至る間に配置されている、井戸層(図2では、11c~11e)が第2近接井戸層11b以降の井戸層である。これらの井戸層11a~11eと障壁層10を交互に重層して5周期のMQW構造1dが構成されている。

【0025】図2において、n形及びp形クラッド層13、14は、n形及びp形の例えば、窒化アルミニウム・ガリウム混晶( $Al_{1-y}Ga_{1-y}N$ :  $0 \leq y \leq 1$ )から構成できる。井戸層11a~11eが障壁層10及び介在層12よりも小さな禁止帯幅の半導体材料から構成するのは、量子準位を創生するための常套手段である。窒素に加えて他の砒素(As)やリン(P)等の第V族元素を構成元素とする、例えば、砒化窒化ガリウム混晶

( $GaN_{1-y}As_y$ :  $0 < y < 1$ )やリン化窒化ガリウム( $GaN_{1-z}P_z$ :  $0 < z < 1$ )等のn形III族窒化物半導体材料からも井戸層を構成することは可能である。しかし、インジウム(In)を構成元素として含むことにより、短波長可視光を発するに好適な禁止帯幅が

より好適にもたらされるインジウム含有III族窒化物半導体材料、特に、 $Ga_{1-x}In_xN$ 混晶から井戸層を好んで構成する。

【0026】井戸層及び障壁層は、n形の伝導を呈するIII族窒化物半導体結晶層から構成するのが好ましい。井戸層及び障壁層は、第IV族元素の珪素(Si)や錫(Sn)、または第VI族の硫黄(S)やセレン(Se)等のn形不純物をドーピングしたn形III族窒化物半導体結晶層から構成できる。しかし、不純物による不用意な準位の形成を回避するため、本発明では、アンドープ(undoped)で高純度の $Ga_{1-x}In_xN$ 混晶から井戸層を構成するのが最も好ましいとする。障壁層は、特に導電性に優れるn形結晶層から構成するのが好ましい。

【0027】障壁層並びに井戸層として作用させるに好適な層厚は、本発明においては、特に規定を加えるべき事項ではない。キャリアの移動(transport)に対する障壁作用を呈する障壁層、及び発光を担う井戸層にとって好適な層厚は、クローニッヒ・ペニー(Kronig-Penny)則などの量子力学理論が自ずと教示するところである(K. Seeger著、「セミコンダクターの物理学(上)」(株)吉岡書店、1991年6月10日第1刷発行)、12~21頁参照)。強いて言及すれば、障壁層は、約10~20nm程度のトンネル(tunnel)効果が発揮できる層厚とするのが一般的である。井戸層の層厚は概ね、10nm或いはそれ未満とするのが一般的である。MQW構造を成す井戸層と障壁層並びに介在層の構成要件は、SQW構造の発光層を構成する場合と同一である。MQW構造の発光層を構成する障壁層の層厚は、敢えて同一とする必要はない。同じく、MQW構造を構成する井戸層の層厚は敢えて統一する必然性もない。

【0028】介在層12は、終端井戸層11aを構成する例えば、n形 $Ga_{1-x}In_xN$ よりも禁止帯幅が大きなIII族窒化物半導体材料から構成する。特に、後述する様に、インジウム濃度を相違する複数の相から成る多相構造から終端井戸層11aが構成されている場合、終端井戸層11aを主体的に構成する主体相を構成する物質以上の禁止帯幅を有するIII族窒化物半導体より構成する。また、介在層12は、井戸層11aが放射する短波長の発光に対して透明な、例えば $Al_yGa_{1-y}N$ ( $0 \leq y \leq 1$ )材料から構成するのが好ましいとする。介在層12は、n形結晶層から構成する。キャリア濃度を約 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 未満、望ましくは $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下とした、低キャリア濃度で高純度のIII族窒化物半導体材料から構成するのが好ましい。層厚は大凡、50nm以下で好ましくは20nm以下が適する。

【0029】介在層12は、低キャリア濃度で高純度の結晶層から構成するのが好ましいとしているため、層厚が必要以上に厚いと発光素子の順方向電圧が上昇するな

ど、低電圧で駆動可能な低消費電力の発光素子を得る際に不都合を招く。介在層12が逆に、極端に薄いと膜の連続性が損なわれ、終端井戸層11aの表面を一樣の層厚をもって被覆するに至らず、終端井戸層11aで、後述するバンドの曲折を均一に発生させるに不十分となる。従って、介在層の層厚は2nm以上とするのが好ましい。

【0030】図3は、図1に示した第1の実施形態に係わるSQW構造1bの発光層1aを備えた発光部1の各層の接合界面近傍のエネルギーバンド構成をより詳細に説明するためのバンドダイアグラム(band diagram)である。第1の実施形態に係わるバンド構成の特徴は、n形介在層12との接合界面15a近傍における終端井戸層11aの内部領域に限り、伝導帯16がフェルミレベル17側に下に凸に折れ曲がった曲折により、低ポテンシャル部18が形成されていることにある。

【0031】また、図4に示すのは、図2に示したMQW構造1dに対応するバンドダイアグラムである。SQW構造1a及びMQW構造1dに拘わらず、第1の実施形態に係わるバンド構成の特徴は、n形介在層12との接合界面15a近傍の終端井戸層11a内に、伝導帯16がフェルミレベル17側に下に凸に折れ曲がった曲折により、特に顕著に低ポテンシャル部18が形成されていることにある。

【0032】上記の様に、伝導帯16に低ポテンシャル領域18を形成するためには、終端井戸層11aとn形介在層12とのヘテロ接合界面15aに於いて、組成を急峻に変化させる必要が求められる。例えば、n形 $Al_{1-y}Ga_{1-y}N$  ( $0 \leq y \leq 1$ ) から介在層12を、また、同介在層12よりも小さな禁止帯幅のn形 $Ga_{1-x}In_xN$  ( $0 < x \leq 1$ ) からなる終端井戸層11aとのヘテロ接合系にあって、アルミニウム(Al)若しくはインジウム(In)の原子濃度がそれを構成元素として含む層内の平均的な濃度から2桁、濃度を増減するに要する遷移領域幅は、約20nm以下、望ましくは約15nm以下、更に好ましくは約12nm以下とする必要がある。遷移領域幅は、一般的な2次イオン質量分析法(SIMS)或いはオージェ(Auger)電子分光分析法(AES)などによる元素の分布状態の分析結果を基に

【0033】介在層12と終端井戸層11aとの接合界面15a近傍の領域に局所的に設けた伝導帯16の低ポテンシャル領域部18には、電子19を蓄積させることができる。低ポテンシャル部18を、特に、電子19を供給するp形クラッド層14との接合界面15aに隣接させて、電子19の蓄積領域を設けておけば、電子に比較して、拡散長の短い正孔(hole)を効率的に捕獲

でき、従って、同蓄積領域近傍で有効に電子と正孔との放射再結合を果たせる優位性がある。

【0034】また、伝導帯16の低ポテンシャル部18は、ポテンシャルの一律な割合での変化により形成されているのではなく、介在層12及び終端井戸層11aとの接合界面15a近傍の極く限定された狭い領域での急激なバンド曲折により形成されている。従って、この微小領域に局在するキャリア(電子)は、低次元、例えば2次元キャリアとして挙動できる。このため、低次元であるが故のキャリアの高速走行性をもってして、発光の応答性(response)が俊速な高速応答性の量子井戸構造発光層がもたらされる利点も付随する。

【0035】本願の請求項2に記載の発明に係わる第2の実施形態に示す結晶層の配置関係は、終端井戸層をn形介在層に直接、接合させることを意味する。即ち、量子井戸構造の発光層にあって、終端井戸層から構成することを意味する。この配置は、図1並びに図2に例示されている。n形介在層に直接、接合させるのは、この接合により終端井戸層内に伝導帯の曲折を効果的に発生させるためである。井戸層と共に量子井戸構造を構成するn形障壁層の配置と関連させて、本実施形態の配置関係を纏めれば、終端井戸層はn形介在層とn形障壁層との中間に配置するものである(図1及び図2参照)。SQW構造にあっては、n形障壁層はn形クラッド層に代用させることが出来る。

【0036】本願の請求項3に記載の発明に係わる第3の実施形態に於ける、量子井戸構造を構成する上の特徴は、n形の伝導を呈するのが好ましいとする介在層12と終端井戸層11aと接合するn形障壁層10とは、略同一の組成から成る材料から構成することにある。例えば、n形で高抵抗の $Al_yGa_{1-y}N$  ( $0 \leq y \leq 1$ ) から介在層12を構成する場合には、n形障壁層10はアルミニウム組成比(=Y)を同一とする $Al_yGa_{1-y}N$  ( $0 \leq y \leq 1$ ) から構成する。若しくは、アルミニウム組成比の相違を大凡、 $\pm 0.05$ 以内とする、アルミニウム組成比を略同一とする $Al_yGa_{1-y}N$  ( $0 \leq y \leq 1$ ) から構成する。n形障壁層10の導電性については、介在層12を高純度で高抵抗の結晶層から構成するのを好ましいとするに対し、それと最も近接して対峙するn形障壁層10は、導電性に優れるIII族窒化半導体結晶層から構成するのを良しとする。具体的にはn形障壁層10のキャリア濃度は、導電性を確保するために少なくとも約 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以上、好ましくは約 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ を越え約 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上であることが好ましい。しかし、キャリア濃度が $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ を越えると逆にn形障壁層10の結晶性が低下するので、キャリア濃度は約 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下とするのが好ましい。

【0037】図1に示したSQW構造1bを例にして本実施形態の効用を説明すれば、介在層12及びn形障壁



層10を略同一の材料から構成すると、その中間に配置する終端井戸層11aに、その両側の接合界面15a、15bから印加される応力を略均等とすることができる。この印加される応力が略均等である状況下では、接合界面15a、15bに於けるバンドの曲折の程度を、界面での急峻性如何に依ってより容易に制御することが可能となる。

【0038】更に、介在層12と、終端井戸層11aと接合するn形障壁層10とを略同一の層厚のIII族窒化物半導体材料から構成すると、n形障壁層10及び介在層12の両側から終端井戸層11aに印加される応力の均等化が図れる。それより、終端井戸層11a内に一様に曲折したバンドを発生させるに優位となる。略同一とは、概ね、±10%未満の厚さの差異を指す。

【0039】上記のバンドの曲折が略一義的に接合界面の急峻性をもって決定する技術手段を利用して、本願の請求項4に記載の発明に係わる第4の実施形態では、伝導帯に加えて価電子帯の曲折を形成する。本実施形態に係わるバンド構成を図3のバンドダイアグラムを利用して説明する。第4の実施形態に係わるバンド構成の特徴は、終端井戸層11aのn形障壁層10との接合界面15b近傍の領域に限り、価電子帯20がフェルミレベル17側に上に凸に折れ曲がった曲折により、低ポテンシャル部21が形成されていることにある。さらに第3の実施形態に示す如く、終端井戸層11aを、組成及び層厚を略同一とするn形介在層12及びn形障壁層10に挟持させた構成に依れば、伝導帯16に限らず、価電子帯20側にもバンドの曲折を都合良く形成することができる。

【0040】フェルミレベル17側に曲折した低ポテンシャル部21には、電子19との放射再結合を果す正孔22を有効に蓄積できる。この低ポテンシャル部21は、本来の価電子帯20のエネルギーレベルよりも低位であり、従って、この領域に蓄積された正孔22のエネルギーレベルはそもそも低位となっている。また、上記の様に介在層12との接合界面15a近傍の低ポテンシャル部位18に蓄積された電子19もエネルギーレベルは低位である。故に、この様なバンド構成に於ける電子19と正孔22間の遷移エネルギー23は、終端井戸層11aを構成するIII族窒化物半導体材料の禁止帯幅24より小となる。従って、発光波長は、終端井戸層11aを構成するIII族窒化物半導体材料の禁止帯幅24に対応する波長よりも長波長の発光がもたらされるものとなる。

【0041】図2に示す様に、井戸層内の伝導帯16の曲折の程度は、伝導帯16の本来のポテンシャルレベル( $E_{co}$ )16aと、フェルミレベル17側へ落ち込んだ低ポテンシャル端( $E_c$ )16bとの、エネルギー差( $\Delta E_c = |E_{co} - E_c|$ )16cで表される。一方、価電子帯20の本来のポテンシャルレベル( $E_v$

o)20aと、フェルミレベル17側へ落ち込んだ低ポテンシャル端( $E_v$ )20bとのエネルギー差( $\Delta E_v = |E_{vo} - E_{cv}|$ )20cをもって、価電子帯20の曲折の程度が表される。伝導帯16側の $\Delta E_c (=16c)$ と、価電子帯20側の $\Delta E_v (=20c)$ との総和であるエネルギー差 $\Delta E_c + \Delta E_v$ が本発明の云う合計のエネルギー差である。例えば、終端井戸層11aを構成する半導体材料の正規の禁止帯幅24から、合計のエネルギー差 $\Delta E_c + \Delta E_v$ を差し引いた値が遷移エネルギー23を与える。

【0042】本発明の第5の実施形態では、本願の請求項5に記載の如く、上記の合計のエネルギー差 $\Delta E_c + \Delta E_v$ を0.4eV以上とする井戸層から終端井戸層11aを構成する。少なくとも、 $\Delta E_c + \Delta E_v$ が0.4eV以上である終端井戸層11aは、発光の長波長化をもたらすに都合の良い効果を与えるからである。合計のエネルギー差 $\Delta E_c + \Delta E_v$ を0.4eV以上とするには、終端井戸層を略同一の組成と層厚の介在層及び障壁層を挟持して、双方の結晶層から終端井戸層に略均等に応力を付与することがより好ましい。この様な前提条件が整備されていれば、後述する接合界面の急峻性(日本物理学会編、「半導体超格子の物理と応用」(株)培風館発行、昭和61年9月30日初版第4刷)、139~145頁参照)の達成に依って、少なくとも合計のエネルギー差 $\Delta E_c + \Delta E_v$ を0.4eV以上とする井戸層が構成できる。

【0043】多重量子井戸(MQW)構造を構成する井戸層毎にバンドの”落ち込み”の程度が顕著に異なれば、それに付帯して、井戸層内の低ポテンシャル領域に形成される準位が井戸層に依って異なる。従って、キャリアの遷移エネルギーが井戸層毎に異なる事態を招き、井戸層毎に波長を互いに異にする発光が帰結される不都合が生ずる。単色性のある発光を確保するために、本願の請求項6に記載の発明に係わる第6の実施形態では、この合計のエネルギー差 $\Delta E_c + \Delta E_v$ を基準として終端井戸層の構成を更に規定する。即ち、本発明の第6の実施形態では、多重量子井戸構造の終端井戸層について、上記の合計のエネルギー差( $\Delta E_c + \Delta E_v$ )を他の井戸層の合計のエネルギー差よりも大とした井戸層をもって構成する。

【0044】図4のバンドダイアグラムを利用して説明すれば、第2近接井戸層11bの、障壁層10aとの接合界面15cでの伝導帯16のポテンシャルの”落ち込み”の程度25cを、第1近接井戸層11aの落ち込みの深さ25aよりも小としているのが特徴である。且つ、障壁層10bとの接合界面15dに於ける価電子帯20の落ち込みの程度25dも、第1近接井戸層11a内の価電子帯20の落ち込みの程度25bのよりも小としているのが特徴である。要約すれば、第2近接井戸層11b内に於ける合計のエネルギー差( $25c + 25d$

に相当する)を、終端井戸層11a内の合計のエネルギー差(25a+25bに相当する)よりも小とするのが特徴である。終端井戸層11aの内部の低ポテンシャル部18、21に、第2近接井戸層11bよりも優先的にキャリア(電子19及び正孔22)を蓄積させ、第2近接井戸層11b以降の井戸層11c~11eの内部には、伝導帯16の曲折に依る電子19及び正孔22の蓄積領域を派生的に内在させないためである。

【0045】MQW構造から発光層を構成するにあつて、第1近接井戸層(終端井戸層)11aと第2近接井戸層11bを含むそれ以降の井戸層11c~11eに隣接するn形障壁層を第3の実施形態に則るものとすれば、発光をもたらすためのキャリアとしての電子19が蓄積する領域を、ポテンシャルの関係上、ほぼ一カ所18に集中できる。一方、正孔22が蓄積できる領域も特定の領域21に限定される。即ち、キャリアを終端井戸層11aの内部の特定のポテンシャル領域18、21に限定して閉じ込めたが故に、略一定のエネルギーを有する電子19及び正孔22を放射再結合を起こすように利用できる。このため、発光波長の単一性、即ち、単色性に優れる発光がもたらされる。第2近接井戸層11b以降の井戸層11c~11eの各々に、伝導帯16並びに価電子帯20の“落ち込み”を略同一とする低ポテンシャル部が形成されておれば、形成される量子準位も各井戸間で略同一となり、波長の揃った発光がもたらされる利点がある。第2近接井戸層以降の井戸層内のポテンシャルの“落ち込み”は無いのが理想である。

【0046】終端井戸層11aについて特に、ポテンシャルの“落ち込み”を顕著に形成するためには、終端井戸層に関する接合界面での組成の急峻性をより優れたものとする。例えば、窒化ガリウム・インジウム混晶からなる終端井戸層にあつて、インジウム原子濃度の遷移距離を10nm以下とすると、上記の合計のエネルギー差( $\Delta E_c + \Delta E_v$ )を0.4eV以上とすることができる。一方、大凡、1eV~1.5eVを越える深いポテンシャルの落ち込みを形成すると、発光波長は不都合に長波長となり、短波長可視光の発光を定常的に得るに至らなくなる。例えば、伝導帯より約1.7eVの低いポテンシャル部を形成した、室温禁止帯幅を約3.1eVとするGa<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N結晶から終端井戸層を構成すると、波長が約800nmを越える赤外光が発せられることとなる。

【0047】MQW構造に於ける終端井戸層内のポテンシャルの落ち込みを他の井戸層のそれらに比較して大とするには、終端井戸層の両側の接合界面の急峻性を、他の井戸層の場合に比較して優れたものとすれば良い。界面急峻性に故意に差異を発生させるには、例えば、成膜期間に間隔を設ける、所謂、成長を中断する機会を設ける手法がある。成長を中断して接合界面の急峻性を制御する方法に依れば、成長中断時間を延長すれば、界面の

急峻性は一般に向上する。成長中断期間を設定せずに、連続的に成膜を進行させると、接合界面の急峻性は劣るものとなる。例えば、n形Ga<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N終端井戸層を連続的に堆積すると、その接合界面に於けるインジウム原子濃度の遷移距離は20nmを優に越え、約40nm~約50nmに到達する場合がある。従つて、終端井戸層につき調整された成長中断時間をもって成膜し、他の井戸層の成膜時には敢えて成膜中断時間を設けないなどの操作により、終端井戸層に関する急峻性を他の井戸層のそれに比較して秀逸と成すことができる。

【0048】また、本発明の第7の実施形態に記す如く、MQW構造発光層の構成に於いて、特に、終端井戸層11aを、他の井戸層とは層厚を異にする材料から構成すれば、発光波長に簡便に変化を来たせる利点が得られる。例えば、介在層及び井戸層を構成するIII族窒化物半導体材料に変更を加えずに、終端井戸層11aの層厚のみを、他の井戸層の層厚よりも単純に厚くすると、発光波長は短波長側に移行する傾向を呈する。逆に、終端井戸層11aのみを、単純に他の井戸層に比べてより薄層から構成すると、発光の長波長化が果たせる。従つて、量子井戸構造からなる発光層にあつて、発光波長に支配的な影響を及ぼす終端井戸層の層厚11aを、他の井戸層よりも薄くすれば、結晶性が劣化する不都合を招く高インジウム組成比のGa<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N結晶層から敢えて井戸層を構成する迄もなく、発光波長の長波長化が達成され得て便利である。

【0049】終端井戸層11aの層厚を薄くすると、n形障壁層10と介在層12とから被る応力の度合いは増加する。このため、終端井戸層11aとの接合界面15aでの伝導帯16及びn形障壁層10との界面15bでの価電子帯20の双方に於けるバンドの曲折は、更に増すものとなる。このため、バンドの曲折の増加により低ポテンシャル部18、21に形成されるエネルギー準位がより低位となる。従つて、キャリア間の遷移エネルギーは厚膜の終端井戸層の場合に比べて、より減少されるに至り、長波長の発光を得るに都合の良い構成が帰結される。即ち、従来の如く、結晶性に劣る高インジウム組成比の窒化ガリウム・インジウム混晶から敢えて、終端井戸層を構成する必要も無く、長波長の発光を獲得するに更に優位となる構成が得られる利点がある。

【0050】この長波長化現象は、従来の一般的な矩形ポテンシャル構成の量子井戸構造から発現される現象とは、全く逆の現象である。従来の矩形ポテンシャル構成の量子井戸構造では、井戸層の厚さ、即ち、井戸幅が減少すれば、井戸内に形成される準位はより高くなる。従つて、量子準位間の電子の遷移エネルギーは増大し、故に、発光波長は短波長となる。一方で前記の如く、この従来の量子井戸構造とは異なり、井戸幅の減少と共に長波長の発光をもたらす構成が開示されているものの、

長波長化現象をもたらすに足るバンド構成が全く不明であったのに対し、本発明では、それが伝導帯及び価電子帯の上記した如くの曲折に基づくバンド構造に依ることを明示するものである。

【0051】本発明の第8の実施形態では、本来、単色性に優れる発光をもたらす量子井戸構造からなる発光層にあって、特に、終端井戸層を本願の請求項7に記載の如く、インジウム組成比が規制された、多相構造の結晶層から構成する。発光強度を増大させるに顕著な効果が上げられるからである。本発明のポテンシャルバンドの構成に依れば、敢えて、結晶性に劣化を来す高インジウム組成比の  $Ga_{1-x}In_xN$  を終端井戸層として採用するに伴う、発光の高強度化を妨げる不合理性を回避できる。本発明に依れば、インジウム組成比 ( $=X$ ) が 0.3 以下の結晶性に劣化を来さない程度の、比較的小さなインジウム組成比の窒化ガリウム・インジウム混晶 ( $Ga_{1-x}In_xN$ :  $0 \leq X \leq 0.3$ ) を難なく終端井戸層として利用して、長波長の発光をもたらす量子井戸構造発光素子を提供できる。

【0052】インジウム組成が上記の範囲内にあり、且つ多相構造の  $Ga_{1-x}In_xN$  ( $0 \leq X \leq 0.3$ ) からなる終端井戸層からは、特に強度に優れる発光がもたらされる。多相構造とは、インジウム組成比 ( $=X$ ) を相違する複数の塊 (domain) 或いは相 (phase) の混合からなる結晶体である (特開平 10-56202 号参照)。層内に支配的に存在する相 (塊) を主体相とすれば、主体相内とその相内に従属的に散在する相 (従属相) とからなるのが多相構造である。従属相はもっぱら、微結晶体の呈をなす場合が全んどであり、この微結晶体が時として量子ドット (quantum dot) 的な作用を発揮するが故に、強度的に優れる発光が得られる。また、主体相と従属相とは、概して、インジウム組成比を相違するものであって、それ故に、主体相と従属相との接合界面で発生する格子歪も発光強度の増大に寄与するものとなる。

【0053】多相構造からなる終端井戸層は、同層を例えば、有機金属熱分解気相堆積 (MOCVD) 法、分子線エピタキシャル (MBE) 法或いはハロゲン化物やハイドライド (水素化物) を原料とする気相エピタキシャル (VPE) 法で成膜した後に、適正化された条件の基で加熱、冷却を施せば定常的に形成できる。

【0054】本発明の第9の実施形態では、多相構造からなる  $Ga_{1-x}In_xN$  ( $0 \leq X \leq 0.3$ ) 結晶層にあって、特に、酸素原子を適正な濃度で含む  $Ga_{1-x}In_xN$  ( $0 \leq X \leq 0.3$ ) 結晶層から終端井戸層 11a を構成する。酸素濃度の適正化により、高強度の発光を与える終端井戸層 101a が構成できる。特に、酸素原子濃度を、望ましくは  $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  未満、更に望ましくは、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  以下とする  $Ga_{1-x}In_xN$

( $0 \leq X \leq 0.3$ ) が終端井戸層 11a を構成するため

の結晶層として適する。酸素原子濃度を約  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  或いは約  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  以下とする、極めて酸素原子濃度の低い  $Ga_{1-x}In_xN$  ( $0 \leq X \leq 0.3$ ) 結晶層から終端井戸層を形成すると、却って高強度の発光を定常的にもたらすには至らない場合が多々、認められる。高強度の発光をもたらすに好都合となる酸素原子濃度の範囲は、約  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  以上で、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  以下である。

【0055】酸素原子濃度を好適な範囲とする  $Ga_{1-x}In_xN$  ( $0 \leq X \leq 0.3$ ) 結晶層を得る手段には、例えば、MOCVD 法に依る  $Ga_{1-x}In_xN$  の成膜に際し、含酸素物質からなる不純物或いは酸素を含む官能基 (function group) が付加した化合物を含む有機金属化合物を成長原料として用いる方法がある。例えば、トリメチルガリウム ( $(\text{CH}_3)_3\text{Ga}$ : TMG) を Ga 源とし、トリメチルインジウム ( $(\text{CH}_3)_3\text{In}$ : TMI) を In 源とする  $Ga_{1-x}In_xN$  ( $0 \leq X \leq 0.3$ ) の成膜技術にあっては、酸素濃度を数重量 ppm から十数重量 ppm とする TMG と、数十重量 ppm から約 100 重量 ppm とする TMI とを成長原料とすることにより、酸素原子濃度を上記の好適な範囲内に収納するための前提条件が整えられる。

【0056】終端井戸層をなす  $Ga_{1-x}In_xN$  ( $0 \leq X \leq 0.3$ ) 結晶層内の酸素原子濃度を調節するための別的手段には、 $Ga_{1-x}In_xN$  ( $0 \leq X \leq 0.3$ ) を、酸素含有物質を故意に添加した成長雰囲気内で成膜する手段が挙げられる。酸素含有物質には、一酸化炭素 ( $\text{CO}$ )、二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) や水 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) などがあるが、一酸化窒素 ( $\text{NO}$ ) や二酸化窒素 ( $\text{NO}_2$ ) などの酸素含有物質は、III 族窒化物半導体の構成元素である窒素 (N) を含むため、成膜時の成長層からの窒素の揮散を抑制できる観点からしても好ましく用いられる。例えば、水分を数〜数十 ppm の体積濃度で含むアンモニア ( $\text{NH}_3$ ) ガスを窒素源と利用しても、 $Ga_{1-x}In_xN$  結晶層内の酸素原子濃度を制御できる。 $Ga_{1-x}In_xN$  結晶層内の酸素原子濃度は、2 次イオン質量分析法 (SIMS) やオージェ (Auger) 電子分光分析法 (AES) などの機器分析法により定量できる。

#### 【0057】

【作用】請求項1の発明に記載されるバンド構成からは、電子を終端井戸層の内部の領域に選択的に蓄積させる作用が発揮される。これより、低ポテンシャル部位に局在された電子を低いポテンシャルレベルに充填される。

【0058】また、請求項2の発明に記載される終端井戸層の配置に依れば、終端井戸層内に低ポテンシャル部位を確実に創生させることができる。特に、請求項3に記載如く、介在層と、終端井戸層に接合する n 形障壁層とを略同一の組成で、略同一の層厚の材料から構成は、

終端井戸層に略均等に応力を印加する作用を及ぼし、終端井戸層の接合界面に於けるバンドの曲折の有無及びその曲折の程度を容易に制御できる状態を創出する。

【0059】また、請求項4に記載の発明は、正孔を井戸層内の特定の低ポテンシャル領域に選択的な蓄積を来す作用を有する。低ポテンシャル部位に於いて、電子及び正孔が存在するレベルは低いため、キャリア間の遷移エネルギーは減少し、従って、本来の禁止帯幅に対応するよりも長波長の発光がもたらされる。

【0060】また、請求項5に記載の発明は、キャリアを井戸層内に確実に蓄積させる作用を有し、発光の長波長化に優位に作用するバンドポテンシャル構成をもたらし作用を有する。

【0061】また、請求項6の発明に記載の、第1及び第2近接井戸層との間に於けるポテンシャルの関係は第1近接井戸層、即ち、終端井戸層内に優先的に電子及び正孔を蓄積する作用を發揮する。これより、量子井戸構造からの発光をより単色化するに作用する。

【0062】また、請求項7の発明に記載の、他の井戸層よりも薄い層厚からなる終端井戸層は、発光波長の長波長化を簡便に達成できるポテンシャル構成をもたらし作用を有する。

【0063】また、請求項8に記載した終端井戸層の構成は、終端井戸層からの発光強度を増加させる作用を有する。特に、請求項9に記載の、酸素原子濃度が規定された終端井戸層は、発光の強度を更に増加させる作用を有する。

#### 【0064】

【実施例】（実施例1）本実施例1では、SQW構造から成る発光ダイオード（LED）を例にして、本発明を具体的に説明する。図5は、本実施例で作製した積層構造体41からなるLED40の断面構造を示す模式図である。

【0065】サファイア（ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、単結晶）からなる結晶基板400の（0001）面（c面）上には、同基板400との接合界面を主に単結晶とし、その上層部を多結晶或いは非晶質を主体として構成したアンドープの窒化ガリウム（GaN）からなる緩衝層401を450℃で堆積した。層厚を約17nmとする緩衝層401上には、キャリア濃度を約 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ とし、層厚を約0.5 $\mu\text{m}$ とするアンドープでn形のGaN層402を堆積してある。アンドープn形GaN層402の上には、珪素（Si）のドーピング濃度を層厚の増加方向に増加させた、即ち、層厚の増加方向にキャリア濃度を漸次、増加させたn形GaN層403が堆積されている。

【0066】このn形GaN層403を下部のn形のクラッド層として利用して、その上に、層厚を20nmとするアンドープのn形GaN（キャリア濃度 $=4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ）からなる障壁層404を堆積した。

【0067】障壁層404上には、終端井戸層405たる井戸層を890℃で堆積した。終端井戸層405は、層厚が約7nmのアンドープのn形Ga<sub>0.88</sub>In<sub>0.12</sub>Nから構成した。TMGをガリウム源とし、結合価を1価とするシクロペンタジエニルインジウム（C<sub>5</sub>H<sub>5</sub>In）をインジウム源として（J. Crystal Growth, 107（1991）、360～364頁参照）、n形Ga<sub>0.88</sub>In<sub>0.12</sub>N終端井戸層405の成膜を、双方の原料の常圧MOCVD反応炉への供給を停止することをもって終了させた。終端井戸層405の成膜後、原料ガスのMOCVD反応炉への供給を停止する成長中断の期間を3分間に亘り設け、その間、アンモニア（NH<sub>3</sub>）ガスのみを流通させて、MOCVD反応炉内よりインジウム源及びガリウム源の残留が無き様に掃引、排除した。

【0068】成長中断後、n形障壁層404と同一の材料からなる、同一の層厚のn形GaNを介在層406として堆積した。介在層406のキャリア濃度は、約 $7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ とした。即ち、n形介在層406は、n形障壁層404と伝導形も同一とする材料から構成したが、キャリア濃度をn形障壁層404よりも低とする、より高抵抗で高純度のIII族化合物半導体結晶層から構成した。

【0069】上記のn形障壁層404及び介在層406とで井戸層405を挟持して、SQW構造の発光部42を構成した。n形介在層406と井戸層405との接合界面43での急峻性を、インジウム（In）濃度が井戸層405内の平均的濃度より2桁、原子濃度を減するに要する遷移距離を一般的なSIMS分析手段により測定したところ、約14nmであった。この急峻性は、n形介在層406とn形井戸層405との接合界面43での伝導帯の屈曲（ベンディング）を発生させるに充分なものとなった。

【0070】n形介在層406上には、マグネシウム（Mg）ドーパドp形Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>N層をp形クラッド層（層厚=15nm）407として堆積した。p形クラッド層407上には、層厚の増加方向にアルミニウム（Al）組成比を0.15から0に略直線的減少させたp形Al<sub>Y</sub>Ga<sub>1-Y</sub>N（Y=0.15→0）層をコンタクト層（層厚=0.1 $\mu\text{m}$ 、キャリア濃度 $=2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ）408として堆積し、積層構造体41を構成した。

【0071】公知のフォトリソグラフィ技術を利用したパターンニング加工を介して、積層構造体41にプラズマエッチング加工を施して露呈したn形クラッド層403の表面上には、n形オーミック（Ohmic）電極409を設けた。また、p形コンタクト層408の表面上には、p形オーミック（Ohmic）電極410を設けてLED40を構成した。

【0072】両オーミック電極409、410間に、

3. 5 ボルト (V) の直流電圧を印加して、20 ミリアンペア (mA) の順方向電流を流通して LED40 を発光させた。発光の中心波長は約 450 nm であり、終端井戸層 405 を構成する  $Ga_{0.98}In_{0.02}N$  の室温での禁止帯幅 (約 3.1 eV) に対応するよりも、約 0.34 eV 程度低い遷移エネルギーに相当する長波長の発光がもたらされるものとなった。また、発光の半値幅は約 13 nm であった。チップ (chip) 状態で、一般の積分球を利用して測光される発光強度は約 23 マイクロワット ( $\mu W$ ) に達した。即ち、本実施例では、低ポテンシャル側に屈曲した価電子帯構造を有する終端井戸層を発光層としているため、長波長化された発光と共に、単色性にも強度的にも優れる発光をもたらす LED が得られた。

【0073】(実施例2) 本実施例では、本発明のポテンシャル構成を内包する多重量子井戸構造 (MQW) からなる発光層を備えた LED を形成する場合を例にして、本発明を具体的に説明する。図6は、本実施例の LED50 の断面構造を示す模式図である。結晶基板40より n 形クラッド層403に至る構成は、実施例1に

記載の通りとした。

【0074】n 形クラッド層403を構成する n 形 GaN 層上には、アンドープで n 形の GaN を障壁層500とし、アンドープで n 形の  $Ga_{0.98}In_{0.02}N$  を井戸層501とした、一対の積層構造単位51aを4周期、積層させた多重量子井戸構造51bからなる発光層52を配置した。障壁層500の層厚は約15 nm とした。また、井戸層501の層厚は4 nm とした。障壁層500及び井戸層501のキャリア濃度は、何れも  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  としてある。この MQW 構造51bは、n 形クラッド層403と接合する層を、アンドープで n 形の GaN を障壁層500とし、終端井戸層501aを n 形の  $Ga_{0.98}In_{0.02}N$  から構成してある。

【0075】終端井戸層 (第1近接層) 501a に次いで近接する第2近接井戸層501b以降の n 形クラッド層403側に在る井戸層501c、501d と障壁層500との接合界面の急峻化を達成するための措置は、特に講じていない。即ち、第2近接井戸層501bを含めて他の井戸層501c～501d は、障壁層500に時間的に連続させて成膜させており、成長中断操作は行っていない。反面、MQW 構造51bの発光層52の終端をなす終端井戸層501aを成膜する際には、最終端の n 形障壁層500aの成膜を終了した後、時間的に連続させて終端井戸層501aを成膜せずに、原料ガスの MOCVD 成長炉内への供給を意識的に4分間に亘り停止した。この成長中断の有無に依って、終端井戸層501aの n 形障壁層500aとの界面の価電子帯の低ポテンシャル側への曲折の程度を、第2近接井戸層501bを含めて他の井戸層501c～501d に比較して大とした。上記の成長中断操作により、終端井戸層501aと

n 形障壁層500aとの接合界面に於ける、実施例1に記したインジウム原子濃度に関する遷移距離を約12 nm とした。

【0076】終端井戸層501a上には、層厚を最終端の n 形障壁層500aと同一の20 nm とし、アルミニウム組成比を0.05とする窒化アルミニウム・ガリウム混晶 ( $Al_{0.05}Ga_{0.95}N$ ) からなる n 形介在層503を堆積した。n 形介在層503は、n 形障壁層500aと略同一の組成の材料から構成しながらも、キャリア濃度は約  $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  未満と障壁層500aよりも低キャリア濃度の材料から構成してある。

【0077】終端井戸層501a上に n 形介在層503を堆積するに際し、上記の如くの成長中断時間を設けた。成長中断時間は敢えて画一とする必要はないが、n 形介在層503を堆積する以前の成長中断時間も上記の場合と同じく4分間とした。これより、終端井戸層501a内の平均的濃度からインジウム原子濃度を2桁減少させるに要する、n 形介在層503との接合界面から n 形介在層503の内部への距離 (遷移距離) を約13 nm とした。

【0078】n 形介在層503上には、実施例1に記載した p 形クラッド層407及び p 形コンタクト層408を順次、積層させて積層構造体51を構築した。

【0079】積層構造体51に加工を施して作製した p n 接合型の DH 構造の LED50 に、約3.4～3.5 V の順方向電圧を印加して、20 mA の順方向電流を流通させた際には、発光の中心波長を約470 nm とする青色発光が帰結された。即ち、終端井戸層を構成する  $Ga_{0.98}In_{0.02}N$  が有する正規の禁止帯である約3.1 eV を約0.46 eV 程、下回る約2.64 eV の遷移エネルギーに相当する発光が帰結された。発光スペクトルの半値幅は、約12 nm と更に狭帯化されているものとなった。チップ状態での発光の強度は約25  $\mu W$  の高強度であった。

【0080】(実施例3) 本実施例では、特に、請求項7に記載の構成要素を備えた LED を作製する場合を例にして本発明を具体的に説明する。

【0081】本実施例では、実施例2に記載の4周期からなる MQW 構造を構成するにあたり、終端井戸層501aを構成する n 形の  $Ga_{0.98}In_{0.02}N$  結晶層の層厚を、第2近接井戸層501b及びそれ以降の井戸層501c～501d より薄層となして構成した。すなわち、終端井戸層501aの層厚は5 nm とし、それ以外の井戸層501b、501c～501d の層厚は10 nm とした。このようにして、実施例2とは終端井戸層501aの層厚のみを変更して成る積層構造体から LED を構成した。

【0082】n 形及び p 形オーミック電極間に約3.2 V の順方向の電圧を印加して、約20 mA の順方向電流を流通させて発光させた。発光の中心波長は、実施例2

のLEDのそれに比し、約490nmとより長波長となった。この波長は、井戸層を構成するGa<sub>0.90</sub>In<sub>0.10</sub>Nの正規の禁止帯幅である約3.1eVに比して、約0.57eV小さい約2.5eVの遷移エネルギーに相当するものである。即ち、終端井戸層を構成する窒化ガリウム・インジウム混晶の組成を変えずとも、単純に終端井戸層の層厚を減少させることによって、多重量子井戸構造の発光層からの発光を長波長となせることが示された。また、発光スペクトルの半値幅は約14nmとなり、しかも、チップ状態での発光強度は視感度補正を施した後に於いて約27μWの高さに達した。これより、本実施例に記載の構成に依れば、単色性にも、また、強度的にも優れる比較的長波長の可視光を発光できる量子井戸構造発光素子が提供できることが示された。

【0083】（比較例1）実施例3に記載と同様のLEDを構成するにあたり、即ち、終端井戸層501aの層厚を他の井戸層501b～501dより薄層として成るMQW構造51bを備えたLEDを作製するにあたり、第2近接井戸層501bのn形介在層503側の障壁層500a及びn形障壁層500bの双方との接合界面での界面急峻性を向上させるものとした。即ち、n形障壁層500bの成長を終了した後、1分間に亘る成長中断時間を設け、また、第2近接井戸層501bの成長後、同じく1分間の成長中断時間を設けることにより、第2近接井戸層501bに係わる双方の接合界面の急峻性を略同一とした。これより、終端井戸層501aと同じく伝導帯、及び価電子帯の双方に低ポテンシャル部を有する第2の近接井戸層501bを備えたMQW構造51bを形成した。

【0084】AESに依る分析結果を基に求めた、比較例1に記した遷移距離は、第2終端井戸層501bに関する双方の接合界面で約15nmとなった。これから判断すれば、終端井戸層501aについての遷移距離に比較して約3～4nm程、急峻性に劣るものとなった。

【0085】実施例1乃至3に記載したのと同様にしてpn接合型のDH構造のLEDを作製して発光特性を評価した。実施例3のLEDの特性との比較に於いて、発光の中心波長は、終端井戸層内に形成したバンドの変曲の影響により、約505nmと若干ながら長波長となった。一方、図7に発光スペクトル53を示す如く、本比較例1のLEDは、中心発光波長を与える主たるスペクトル53aに加えて、これより短波長側に、中心の波長を約480nmとする副次的なスペクトル53bの発生が認められた。副次的なスペクトル53bの出現により、実施例3のLED50からの発光スペクトル53に比較すれば、半値幅は約21nmとより劣るものとなった。

【0086】図7の発光スペクトルを比較すれば明らかな様に、副次的なスペクトル53bは、実施例3のLED50からは発生していない。一方、第2近接井戸層5

01bを障壁層500a、500bとの接合界面に低ポテンシャル部を設けた井戸層から構成すると、発光の単色性を乱す副次的なスペクトル53bが出現する。従って、このような副次的なスペクトル53bは、上記の如くのパテンシャル構成を備えた第2近接層501bに由来するものと解釈される。換言すれば、多重量子井戸構造(MQW)からなる発光層にあって、発光波長を画一化させる、或いは発光スペクトルの半値幅を狭帯化させるなどの発光特性の改善を果たすには、第2近接井戸層内に於ける伝導帯及び価電子帯のパテンシャルの落ち込みを極力、抑制すべきであることが教示される結果となった。

【0087】（実施例4）本実施例では、特に、請求項8及び9に記載の構成からなる発光層（終端井戸層）を備えた、発光強度に優れる量子井戸構造LEDを作製する場合を例にして本発明を具体的に説明する。

【0088】実施例1に記載と類似のLED用途の積層構造体（図5参照）を構成するに当たり、n形障壁層404の成膜終了後、終端井戸層405の成膜を開始するに至る間に、実施例1に記載の成長中断操作を施した。

【0089】本実施例では、終端井戸層405を、酸素を含有する多相構造のn形窒化ガリウム・インジウム混晶(Ga<sub>0.82</sub>In<sub>0.18</sub>N)から構成した。終端井戸層405を常圧MOCVD技術を利用して成膜する際には、主にメトキシ(methoxy: -OCH<sub>3</sub>)基を付加した有機化合物を酸素不純物として約60重量ppmの濃度で含むトリメチルインジウム((CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>In)をIn源とした。これにより、酸素原子濃度を約8×10<sup>18</sup>cm<sup>-3</sup>とし、且つインジウム組成比を0.18とするアンドープのn形Ga<sub>0.82</sub>In<sub>0.18</sub>Nを成膜した。

【0090】層厚を約5nmとし、キャリア濃度を約5×10<sup>17</sup>cm<sup>-3</sup>とする終端井戸層405を885℃で成膜を終了した後は、次層のn形介在層406の成長温度である1070℃に約100℃/分の速度で、2分間で昇温した。この昇温に要した時間と、原料ガスのMOCVD反応炉への供給を中断した3分間と併せて合計5分間に亘る成長中断時間を設けた。終端井戸層405の成膜の前後に於いて成長中断の期間を設けることにより、n形障壁層404及びn形介在層406との双方の接合界面に於ける急峻性を約14nmとした。

【0091】然る後、1070℃で3分に亘って、実施例1と同様のp形Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>Nクラッド層407を成長させた。p形Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>Nクラッド層407に続き、10分間に亘り、アルミニウム組成比(=X)を0.15から表面に向けて0に減少させる組成勾配を付したp形Al<sub>X</sub>Ga<sub>1-X</sub>N(X=0.15→0)コンタクト層408を成長した。p形コンタクト層408の成膜が終了した後は、950℃に毎分約40℃の速度で冷却した。続けて、950℃から650℃に15℃

／分の速度で冷却した。終端井戸層 405 に、この様な冷却速度を異にする 2 段階の冷却を施し、終端井戸層 405 をインジウム組成比を相違する多相構造の結晶層となした。

【0092】図 8 は、上記の冷却工程を経過した後に於ける、終端井戸層 405 の内部の結晶構造を示す透過型電子顕微鏡 (TEM) 像である。終端井戸層 405 は、インジウム組成比 (=X) を 2~3% とする  $Ga_{1-x}In_xN$  からなる主体相 S と、インジウム組成比を約 15~25% 程度とする  $Ga_{1-x}In_xN$  の微結晶体からなる従属相 T とからなる多相構造となっている。主体相 S と従属相 T との境界領域の多くには、双方のインジウム組成比の相違に起因する格子定数の差異に起因して発生すると考慮される格子歪を内包する領域 U の存在が認められた。また、終端井戸層 405 内の酸素原子濃度は、重金属に比較すれば検出感度が劣るために正確に定量するに至らなかった。しかし、酸素は、主体相 S 及び従属相 T の双方の相領域に含有されており、強いて云えば、従属相 T の内部により多く存在する様に見受けられた。

【0093】実施例 1 に記載と同様にして、量子井戸構造 LED を作製した。LED からは、発光波長を約 450 nm とする青緑色帯の発光が放射された。これは、終端井戸層を構成する  $Ga_{0.92}In_{0.08}N$  が有する本来の禁止帯幅である約 3.0 eV に比べて、約 0.34 eV 低い遷移エネルギーに相当する発光であった。また、発光スペクトルの半値幅は約 12 nm となった。これらの特性には、実施例 1 の LED のそれと然したる相違は認められなかった一方で、発光強度は、実施例 1 の LED の強度を約 30% 上回る約 30  $\mu W$  となった。これより、そもそも高い結晶性を維持できるインジウム組成比を 0.3 以下とした上に、酸素を適量を含む、多相構造となした  $Ga_{1-x}In_xN$  から構成した終端井戸層は、高発光強度の量子井戸構造発光素子をもたらすに特に、効果があることが示された。

#### 【0094】

【発明の効果】請求項 1 に記載の発明に依れば、単色性に優れる発光をもたらす量子井戸構造の元来の特性を発揮させつつ、高インジウム組成比の結晶性に劣るインジウム含有 III 族窒化物半導体層を取えて、発光層として利用せずとも、終端井戸層の n 形介在層との接合面で発光の長波長化を促すに利便なバンドの低ポテンシャル側への曲折を発生させることができ、これより、発光の長波長化に都合の良い量子井戸構造発光素子を提供できる効果がある。

【0095】請求項 2 及び 3 に記載の発明では、請求項 1 の発明に加えて、終端の井戸層を n 形障壁層および n 形介在層で挟持し、終端井戸層内にバンドの曲折を発生させるに都合の良い構成としたので、発光の長波長化に都合の良い量子井戸構造発光素子を提供できる効果がある。

【0096】請求項 4 の発明では、正孔を価電子帯の低ポテンシャル部に有効に蓄積できる構成としたため、正規の禁止帯幅よりも小さな遷移エネルギーが与えられ、発光の長波長化をもたらすに特に都合の良い構成を備えた量子構造発光素子を提供できる効果がある。

【0097】請求項 5 の発明では、接合界面での急峻性を確保して、発光波長を長波長側に移行させるのに都合良く作用する伝導帯及び価電子帯の双方のバンドの曲折の程度をより大としたので、キャリアの遷移エネルギーが更に減ぜられ、長波長の発光をもたらすに好都合の量子井戸発光素子が提供できる効果がある。特に、請求項 7 に記載の発明に依れば、接合界面の急峻性に依るバンドの曲折に因る発光の長波長化をより端的に発現できるより薄層から終端井戸層を構成したため、発光の長波長化が簡便に達成できる量子井戸発光素子が提供される。

【0098】また、請求項 6 の発明に依れば、多重量子構造にあって、終端井戸層内の伝導帯及び価電子帯双方のバンドの曲折の程度を他の井戸層のそれに比較して大として、キャリア間の遷移エネルギーの不均一性の拡大を抑制したので、特に、単色性に優れる、長波長の発光をもたらす量子井戸構造発光素子が提供できる効果がある。

【0099】請求項 8 の発明では、量子井戸構造の終端井戸層を、単一組成ではなく、インジウム組成を相違する多相構造とし、尚且、結晶性の悪化を顕著に帰結しないインジウム組成比が 0.3 以下の低インジウム組成比の窒化ガリウム・インジウムから構成したので、高い強度の発光がもたらされ、このため、高輝度の量子井戸構造発光素子を提供できる効果がある。

【0100】更に、請求項 9 に記載の発明では、請求項 8 の発明に記載の如く、低インジウム組成比で、且つ、多相構造の窒化ガリウム・インジウム混晶から終端井戸層を構成するにあって、特に、井戸層内に含有される酸素原子の濃度を適量としたので、更に発光強度に優れる量子井戸構造発光素子を提供できる効果がある。

#### 【図面の簡単な説明】

【図 1】単一量子井戸 (SQW) 構造の発光層を備えた p n 接合型 DH 構造発光部のエネルギー帯構造を示す図である。

【図 2】多重量子井戸 (MQW) 構造の発光層を備えた p n 接合型 DH 構造発光部のエネルギー帯構造を示す図である。

【図 3】本発明に係わる SQW 構造に於けるポテンシャル構成を示すダイヤグラムである。

【図 4】本発明に係わる MQW 構造に於けるポテンシャル構成を示すダイヤグラムである。

【図 5】実施例 1 の LED の断面構造模式図である。

【図 6】実施例 2 の LED の断面構造模式図である。

【図 7】実施例 3 及び比較例 1 に記載の LED の発光スペクトルである。

【図 8】実施例 4 に記載の終端井戸層内部の結晶構成を示す TEM 像の模式図である。

【図 9】従来の単一量子井戸 (SQW) 構造の基本的なエネルギー帯構造を示す図である。

【図 10】SQW 構造のエネルギー帯構造の矩形ポテンシャル構成を示す図である。

【符号の説明】

010、011、10、404、500、500a、500b：バリア層

012、11、11a、11b、11c、11d、11e、501a、501b、501c、501d：井戸層

013、24：井戸層を構成する材料の本来の禁止帯幅

014、015：バリア層の禁止帯幅

016：ポテンシャル井戸部

017、16：伝導帯

018、20：価電子帯

019、020：伝導帯側に形成される量子準位

021、022：価電子帯側に形成される量子準位

023、024、23：遷移エネルギー

1：発光部

1a：発光層

1b：単一量子井戸

1d：多重量子井戸

11a、405、501a：終端井戸層

11b、501b：第 2 近接井戸層

12、406、503：介在層

13、403：n 形クラッド層

14、407：p 形クラッド層

15a、43：終端井戸層と介在層との接合界面

15b：終端井戸層と障壁層との接合界面

15c：第 2 近接井戸層と障壁層との介在層側の接合界面

15d：第 2 近接井戸層と障壁層との接合界面

16a：伝導帯レベル (Eco)

16b：伝導帯の曲折端 (Ec)

16c：伝導帯のポテンシャル差

17：フェルミレベル

18：伝導帯側の低ポテンシャル部

19：電子

20a：価電子帯レベル (Evo)

20b：価電子帯の曲折端 (Ev)

20c：価電子帯のポテンシャル差

21：価電子帯側の低ポテンシャル部

22：正孔

25a：終端井戸層内の伝導帯側の曲折の程度

25b：終端井戸層内の価電子帯側の曲折の程度

25c：第 2 近接井戸層内の伝導帯側の曲折の程度

25d：第 2 近接井戸層内の価電子帯側の曲折の程度

40、50：LED

41、51：積層構造体

400：結晶基板

401：緩衝層

20 402：n 形 GaN 層

408：コンタクト層

409：n 形オーミック電極

410：p 形オーミック電極

51a：量子井戸構成単位

51b：多重量子井戸構造

52：発光層

53、54：発光スペクトル

53a：主たる発光スペクトル

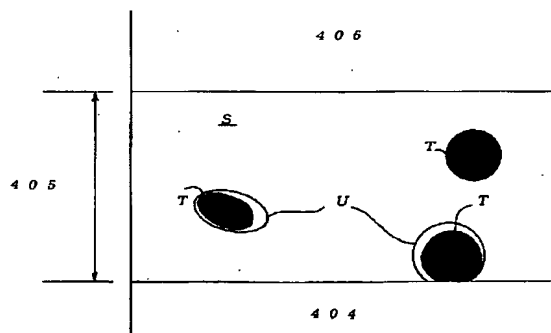
53b：副次的な発光スペクトル

30 S：主体相

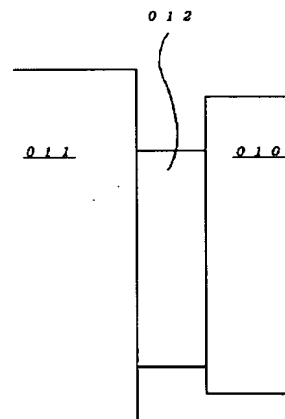
T：従属相

U：歪含有領域

【図 8】

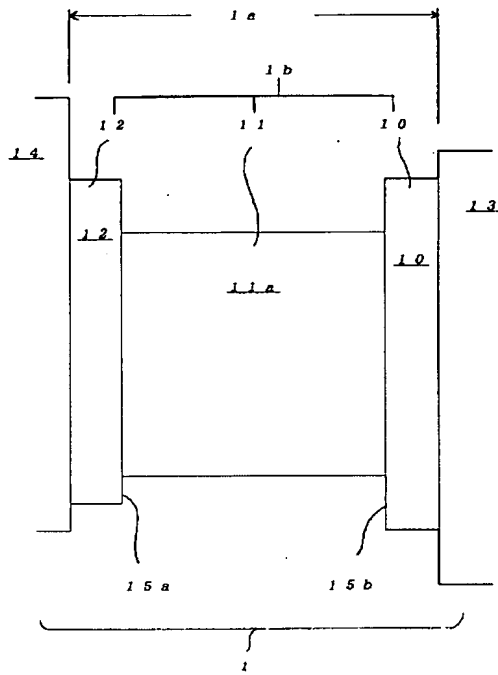


【図 9】

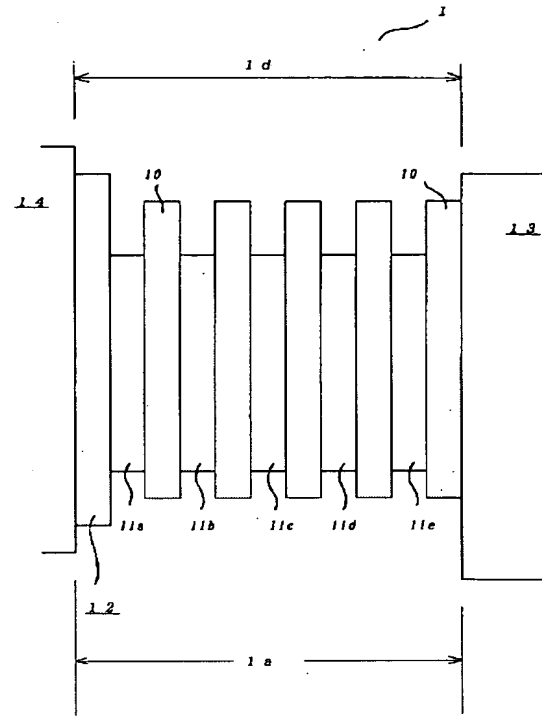




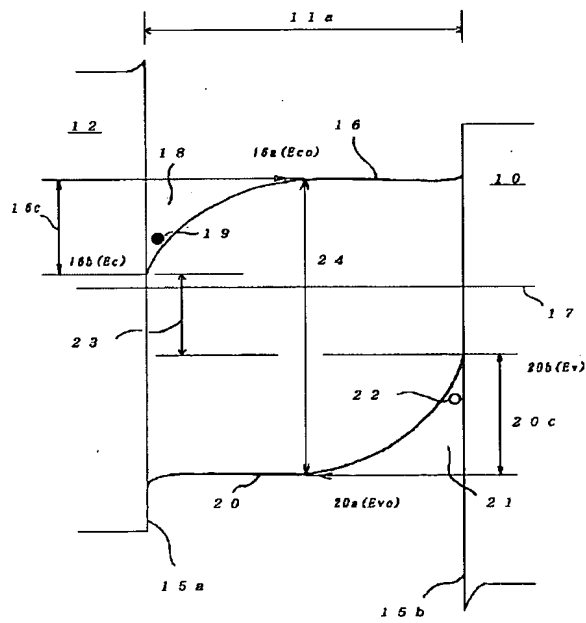
【図 1】



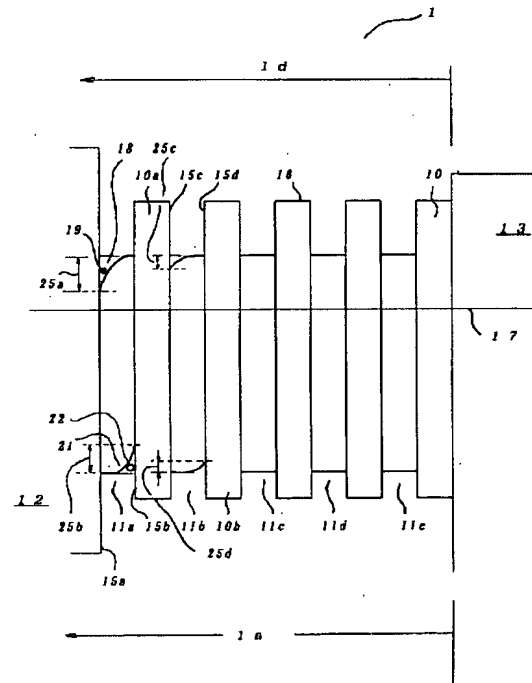
【図 2】



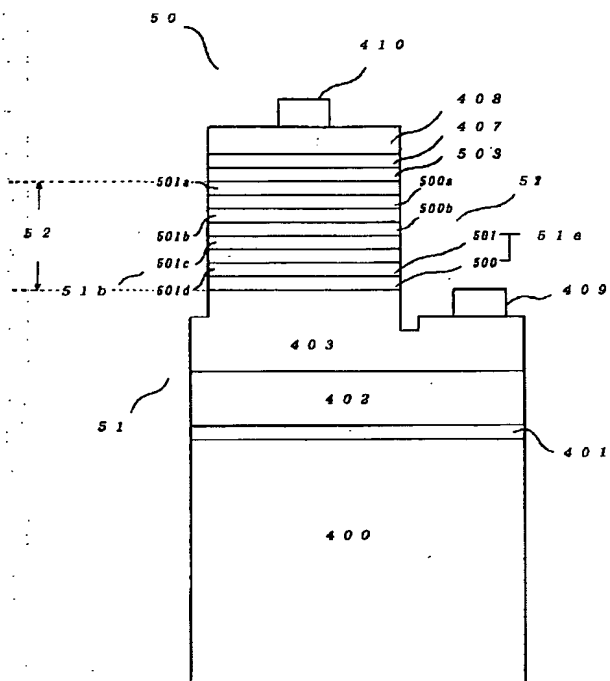
【図 3】



【図 4】



【図 6】



【図 10】

